

# TEK TAŞIYICILI WİMAX (IEEE 802.16-2004) RADYODA TAŞIYICI FREKANS KAYMASINI İZLEME BAŞARIMININ DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Mehmet Akif İLKHAN\*, Ahmet İhsan CANBOLAT\*\* ve Ali ÖZEN\*

\*Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, TRABZON

\*\*Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği, İSTANBUL

[makifilkhan@gmail.com](mailto:makifilkhan@gmail.com), [canbolat@yildiz.edu.tr](mailto:canbolat@yildiz.edu.tr), [aliozen@ktu.edu.tr](mailto:aliozen@ktu.edu.tr)

(Geliş/Received: 11.05.2010; Kabul/Accepted: 29.04.2011)

## ÖZET

Bu makalede, gerçek zaman WiMAX (IEEE 802.16-2004) radyo kanallarında klasik uyarlanırlı denkleştirme algoritmalarının taşıyıcı frekans kaymasını (carrier frequency offset, CFO) izleme başarımları simülasyon ve deneysel olarak değerlendirilmektedir. Belirli bir kanal profilini kullanma yerine bu çalışma 3,5 GHz WiMAX radyo çalışma bölgesinde frekans seçici Rayleigh sönümlenmeli gerçek kanallar üzerine odaklanmaktadır. Çalışmada, en çok kullanılan denkleştirme teknikleri; en küçük ortalama kareler karar geri beslemeli denkleştirici (Least Mean Squares Decision Feedback Equalizer, LMS-DFE) ve öz yinelemeli en küçük kareler DFE (Recursive Least Squares, RLS-DFE) algoritmalarının bit hata oranı (Bit Error Rate, BER) başarımları incelenmektedir. Benzetim sonuçları simülasyon ve deneysel başarımların birbirleriyle son derece uyumlu ve gayet tatmin edici olduğunu göstermektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Deneysel BER, uyarlanırlı denkleştirme, WiMAX (IEEE 802.16-2004), CFO, LMS-DFE, RLS-DFE.

## EXPERIMENTAL EVALUATION OF CARRIER FREQUENCY OFFSET TRACKING PERFORMANCE IN SINGLE CARRIER WiMAX (IEEE 802.16-2004) RADIO

### ABSTRACT

Simulation and experimental carrier frequency offset (CFO) tracking performances of conventional adaptive equalization algorithms have been evaluated in real-time WiMAX (IEEE 802.16-2004) radio channels in this paper. Instead of using a certain type of channel profile this study concentrates on true frequency selective Rayleigh fading channels in WiMAX radio environment around 3.5 GHz. Bit Error Rate (BER) performances of the most commonly used conventional equalization techniques; Least Mean Squares Decision Feedback Equalizer (LMS-DFE) and Recursive Least Squares DFE (RLS-DFE) algorithms are investigated in study. The simulation results have demonstrated that the simulation and experimental performances are compatible with each other and extremely satisfying.

**Key Words:** Experimental BER, adaptive equalization, WiMAX (IEEE 802.16-2004), CFO, LMS-DFE, RLS-DFE.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) teknolojisi uç kullanıcıya kablosuz geniş bant

erişimini en ucuz şekilde sağlamayı amaçlamaktadır. Video ve ses iletimi, online oyun, video konferans, IP üzerinden ses (VoIP) ve dosya transfer protokolü (FTP) gibi uygulamalar band genişliği ve verimlilik

gibi hizmet kalitesi (QoS) yönüyle önemli gereksinimler duyarlar. Değişik veri yükü ve servislerini sağlayabilen mevcut kablosuz erişim teknolojilerini kırsal alanlarda ve en uzak kullanıcı erişiminde kullanmak oldukça pahalıdır. Daha çok ve çeşitli uygulamaları destekleyen kablosuz geniş bant erişimi için WiMAX teknolojisi uygun bir alternatif sunar [1-4].

11 GHz.'in altında lisanslı ve lisanssız bantlarda geniş bantlı kablosuz metropol alan ağ (Metropolitan Area Network, MAN) standartları IEEE 802.16 (WiMAX) çalışma grubu, Avrupa telekomünikasyon standartları enstitüsü (European Telecommunications Standards Institute, ETSI), geniş bantlı radyo erişim ağı (Broadband Radio Access Network, BRAN) ve yüksek performanslı metropol alan ağ (High Performance MAN, HiperMAN) grubu tarafından geliştirildi [5, 6]. Standardın ilk evresinde, sabit kablosuz erişim için 11-66 GHz frekans bölgesi için tek taşıyıcılı (Single Carrier, SC) sistemler ve 11 GHz.'in altındaki frekans bölgeleri için çok taşıyıcılı (Multi Carrier, MC) sistemler düşünüldü. IEEE 802.16-2004 [5] ve IEEE 802.16e [6]'nin yayınlanmasıyla, standartların uygulamaları 11 GHz frekans bölgesinin altındaki sistemler ve gezgin kablosuz ağlar için SC haberleşme sistemlerine genişletildi. WiMAX standardı, SC ve MC sistemlerde yayılmış BPSK (Spread BPSK, S-BPSK), QPSK, 16-QAM, 64-QAM ve 256-QAM gibi sayısal modülasyon tekniklerinin oldukça geniş bir aralığını desteklemektedir [5].

Bununla birlikte, herhangi bir kablosuz haberleşme sisteminde olduğu gibi, frekans seçici kanalın çok yol etkilerinden kaynaklanan semboller arası girişim (Inter Symbol Interference, ISI) gönderilen işaretin yayılma hızını ve güvenilirliğini azaltmaktadır. Bu problemi çözmek için en kolay yöntem MC sistemlerdir, ancak bu sistemlerin gezgin haberleşmede ortaya çıkan kanal takibi problemini çözme yetenekleri ve bant verimlilikleri düşük, verici yükselteçleri ise yüksek maliyetlidir [7]. Bu nedenlerle WiMAX standardına SC (IEEE 802.16-2004) sistemlerde ilave edilmiştir.

Bu çalışmanın amacı 3.5 GHz frekans bölgesinde çalışan ve 20 MHz bant genişliğine sahip deneysel bir radyo seti oluşturarak WiMAX standardına tamamen uygun bir şekilde standartta belirtilen tek taşıyıcılı modülasyon türleri için taşıyıcı frekans kaymasının (Carrier Frequency Offset, CFO) olduğu durumlarda bit hata oranı (Bit Error Rate, BER) başarımlarını hem deneysel hem de simülasyon olarak elde etmektir. Çalışma, belirli bir kanal profilini ve yayılma modelini kullanma yerine gerçek ortamda frekans seçici Rayleigh sönümlenmeli kanalların elde

edildiği ölçümlerden yararlanarak Monte-Carlo benzeri bir analizi deneysel olarak yapmayı amaçlamaktadır.

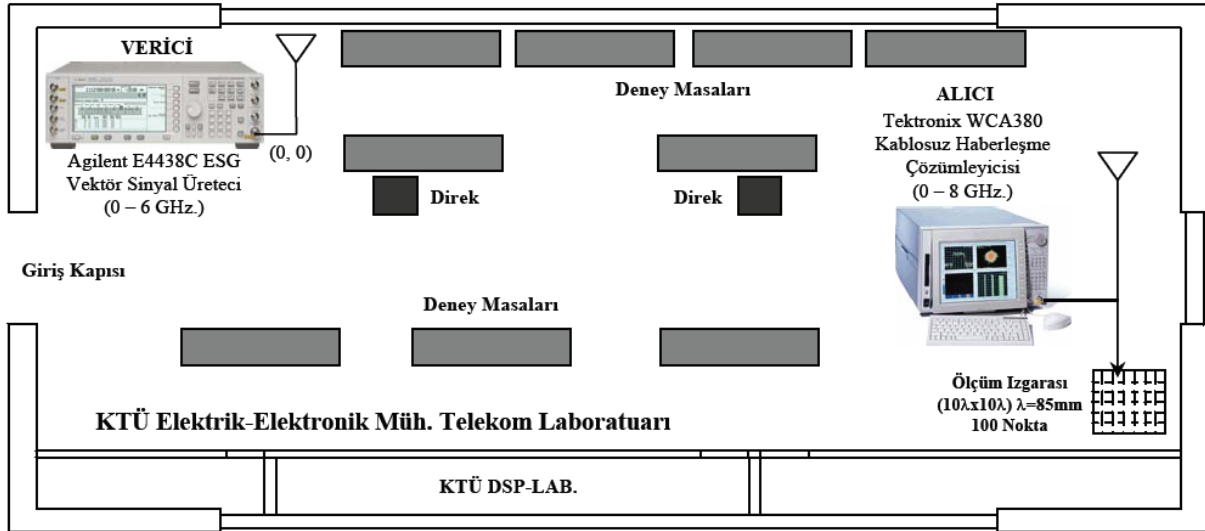
Literatürde çeşitli standartlarda iletim kanalının özelliklerini belirlemeyi amaçlayan çok sayıda deneysel çalışma mevcuttur [8-10]. Yapılan bir çok çalışmada 3,5 GHz bölgesinde bina içinde ya da açık alanda kanalın toplam geciktirme miktarı belirlenmeye çalışılmıştır [11-13]. Bunun yanında, deneysel yoldan BER değerlerini elde etmeyi amaçlayan çalışmalardan biri Takai tarafından kanalın çok yolluluğuna dayanıklı bir modülasyon türü geliştirmek için yapılmıştır [14].

SC sistemlerde ISI'yı yok etmek için etkin bir yol alıcıda uyarlanır kanal denkleştiriciler kullanılmaktadır. Literatür, tek taşıyıcılı sistemler için zaman bölgesi kanal denkleştiricileri bakımından seksenli yıllarda ve doksanlı yılların başlarında yapılan çalışmalarla oldukça zengindir [15-17]. Doksanlı yılların sonlarına doğru dikgen frekans bölmeli modülasyon (OFDM) tekniği iletişim endüstrisine tanıtıldığında, frekans bölgesi kanal denkleştirmenin işlem yükü düşük, sahip olduğu çevrimsel önekle (cyclic prefix, CP) sembol eş zamanlaması da daha basit bulunmuştur. Bununla birlikte OFDM'in uzun sembol süresinden dolayı gezgin iletişim sistemlerine uygulanabilirliği sınırlıdır ve daha yüksek işaret gürültü oranına (SNR) ihtiyaç duymaktadır. Örneğin; IEEE 802.11a ve HIPERLAN/I alıcıları için [17]'de verilen kanala göre benzetim yapıldığında 0,003 gibi bir bit hata oranına tek taşıyıcılı sistem 19-22dB civarlarında ulaşırken aynı BER oranına OFDM sistemi ancak 22-26dB civarlarında ulaşabilmektedir [18]. IEEE 802.16a standardı için benzeri bir sonuç Tubtax tarafından da elde edilmiştir [19]. Bunlara ek olarak, OFDM çok daha yüksek doğrusalılıkta güç yükselteçlerine ihtiyaç duyar. Bu sebeplerle tek taşıyıcılı sistemler, performansı ve özellikleriyle kablosuz haberleşme endüstrisine yeniden tanıtılmalıdır.

Deneysel çalışması yapılan WiMAX radyo sisteminin modeli 2. bölümde ayrıntılı olarak verilmektedir. 3. bölümde kanal denkleştirmeye ilişkin ortalama BER hesaplama işlemleri incelenmektedir. Son bölümde ise deneysel ve simülasyon çalışmaları ele alınarak elde edilen sonuçlar verilmektedir.

## 2. DENEYSEL WiMAX RADYO DÜZENEGİ (EXPERIMENTAL WiMAX RADIO SYSTEM)

Çalışmada kullanılan deneysel WiMAX radio düzeneği Şekil 1'de gösterilmektedir. Şekilde gösterilen verici ünitesinde, daha önceden



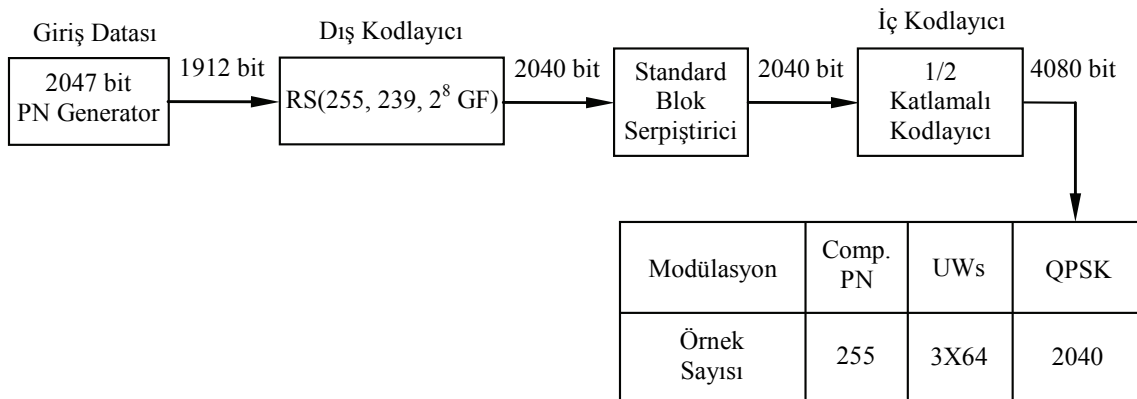
Şekil 1. Bina içi deneysel WiMAX radyo çalışma düzeneği (Indoor experimental WiMAX radio set) [20].

bilgisayarda üretilen temel bant (baseband) işareti vektör işaret üreticisine (E4438C ESG, 0-6 GHz., Agilent) yüklenmektedir. İletimde temel bant filtreleme için kesme sabiti 0,35 olan Raised Cosine (RC) filtresi kullanılır. İşareti antene göndermeden önce IP1 ve IP3 güçleri sırayla 22 dBm ve 35 dBm olan Hittite Microwave tarafından üretilen HMC409LP4 doğrusal güç yükseltici kullanılır. Verici ve alıcıda yaklaşık olarak 9-10 dBi kazançlı ve 60 derece açıklık açısına sahip biquad yönsel antenler kullanılmıştır.

Verici tarafta, bilgisayar ortamında Microsoft Visual C ++ 6.0'da yazılan program ile uzun deneysel data dizisi Şekil 2'deki gibi hazırlanmaktadır. Data paketi IEEE 802.16-2004 Standardında tanımlandığı gibi ([5]'teki Şekil 178'de gösterilen yapıda olup seçilen beş farklı modülasyon türü Tablo 175'te sıralanmıştır) alınmıştır. Alt veri paketlerinin her biri için veri olarak 2047 bit uzunluklu PN (Pseudo Noise) dizisinin 1912 biti alınır ve önce (255, 239, GF  $2^8$ ) Reed-Solomon kodlaması ile standarda uygun olarak kodlanır [5]. Blok serpiştiriciden geçirilen veri 1/2 oranındaki evrişimsel kodlamaya (convolution code,

CC) tabi tutularak kodlama yapılır [5]. Daha sonra, kodlanmış veriler I-Q eşlemeden (modülatör) geçirilerek istenen herhangi bir işaret yıldız kümesine (BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM ve 256-QAM) dönüştürülüp antene verilir. Bu çalışmada, Şekil 2'de gösterildiği gibi kodlayıcı çıkışında elde edilen 4080 bitlik veri QPSK modülasyonuna tabi tutularak karmaşık sembollerden oluşan 2040 bit uzunluğunda veri dizisi kullanılmıştır. Hazırlanan dizi, alıcıda paket başını belirleme, kanalın profilini hesaplama ve benzeri işlemleri gerçekleştirebilmek için 255 sembol QPSK modüleli PN (Pseudo Noise) dizisi ve ardından öğrenme ve kanal kestirimi için 64 sembol uzunluklu 3 CAZAC (Constant Amplitude Zero Autocorrelation Code) dizisinden oluşmaktadır. Sonra, 2040 uzunluklu QPSK modüleli sembollerden oluşan SC payload data dizisi data paketine yerleştirilir.

Üretilen data vektör işaret üreticisine kaydedilir ve 20,48, 10,24, 5,12 ve 1,28 MSample/s sembol hızlarından biri ile peş peşe gönderilir. Bu çalışmada QPSK modüleli gönderilen işaret için 20,48 MSample/s sembol hızı kullanılmıştır.



Şekil 2. Gönderilen data paket yapısı (Transmitted data packet structure).

Alıcı tarafta, deneysel WiMAX radyo alıcısı için kablosuz haberleşme çözümleyicisi (WCA380, 0-8 GHz., Tektronix) kullanılmaktadır. Alınan temel bant işaretini iletim bant genişliğine bağlı olarak 20,48, 10,24, 5,12 ve 1,28 MSample/s örnekleme frekanslarından biri ile örneklenmektedir (bu çalışmada 20,48 MSample/s frekansında örnekleme yapılmaktadır) ve 100 deneysel data dizisi boyunca dahi örnekler çözümleyicide kaydedilmektedir. CFO etkilerini incelemek için, alıcıda 3,45 GHz taşıyıcı merkez frekansı 15 kHz, 30 kHz ve 50 kHz kaydırılarak CFO içeren datalar örneklenmektedir. Bu örneklenmiş diziler temel bant işaret işleme ve BER hesaplamaları için bilgisayara yüklenir. Senkronizasyonu, denkleştirmeyi ve dekodlamayı içeren alıcı algoritması Microsoft Visual C ++ 6.0'da yazılan program ile gerçekleştirilir.

Alıcı algoritması deneysel data dizisinin başındaki PN dizisini kullanarak gönderilen data paketinin başını yakalamaktadır. İşaret gürültü oranının (Signal to Noise Ratio, SNR) kestiriminde kanalın gürültü gücünü hesaplamak için, 3,45 GHz.'de işaret gönderilmediği zaman (RF OFF) alıcıda demodülatörün çıkışında gürültü dizisi aynı örnekleme frekansı (20,48 MSample/s) ile örneklenir. Örneklenmiş gürültü dizisi, modüle edilmiş işaret gönderildiğinde alınan örneklenmiş data dizisi üzerindeki gürültüye benzerdir. Alınan datanın gücü örneklenmiş gürültü dizisinin gücüne bölünerek SNR'nin kestirimi elde edilmektedir [7, 8].

Alıcıda, ilk olarak, örneklenmiş her bir data dizisinde alınan işaret ve gürültü birim değere ayarlanarak alınan data üzerinde normalizasyon yapılmaktadır. Gönderilen datanın birim enerjiye sahip olduğu kabul edildiğinden kanal kestirimi ve denkleştirme algoritmaları gerçekleştirilirken normalizasyon işlemi en önemli adımlardan biridir. Klasik DFE için klasik LMS ve RLS algoritmaları kullanılmaktadır. SC data dizisini denkleştirmek için 5 dallı ileri beslemeli süzgeç ve 4 dallı geri beslemeli süzgeçten oluşan karar geri beslemeli denkleştirici kullanılmıştır. Monte Carlo benzetim programlarına benzer olarak BER değerlerinin deneysel değerlendirilmesi için aşağıdaki bölümde açıklandığı gibi yapılan bir ortalama işlem gerekmektedir [7, 8].

### 3. BER HESAPLAMA İŞLEMİ (BER AVERAGING PROCESS)

Deneysel BER değerlendirme işlemi için, Şekil 1'de gösterildiği gibi bina içi ve bina dışı denemeler için  $10 \times 10 = 100$  noktalı ölçüm ızgarası kullanılmaktadır. Ölçüm ızgarasında her iki nokta arası 8,5 cm'dir. Deneysel çalışma için önerilen ızgara daha önce pek çok çalışmada sunulmuştur [8, 9] ve yalnızca kanal vuruş tepkisi için RMS ya da gecikme yayılmasını elde etmede kullanılmıştır. Bu çeşit deneysel

çalışmalar için kullanışlı üç kriter bulunmaktadır [7, 20]:

1. Ölçüm noktaları arasında SNR farklılıkları olmaması için ızgaranın vericiden yeterince uzakta olması gerekmektedir.

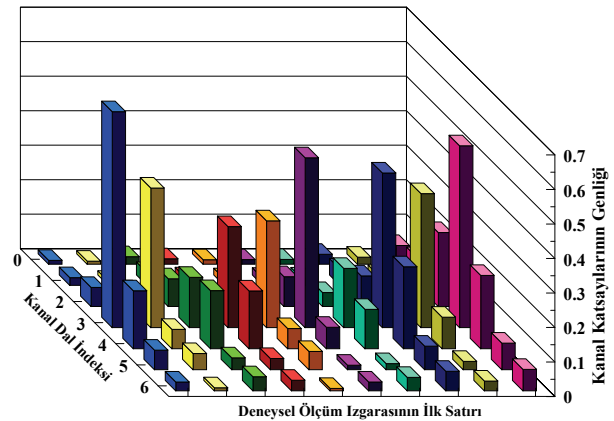
2. Ortalama başarımlar üzerinde büyük bir fark oluşturacak herhangi bir kanal olmaması için yeterli sayıda ölçüm noktası olmalıdır.

3. Kanal profillerinin iltinti oluşturmaması için ölçüm noktaları bir diğerinden farklı olmalıdır ve ölçüm noktaları arasındaki SNR sınırını daha küçük tutmak için ölçüm noktalarının sayısı da sınırlanabilir.

Bu yüzden ölçüm ızgarası 100 noktalı ve ölçüm noktaları arasındaki minimum mesafe 8,5 cm (yaklaşık olarak taşıyıcı dalga boyu) olarak seçildi. Ölçüm ızgarasının fiziksel yerleşimi Şekil 1'de gösterilmektedir.

### 4. SİMÜLASYON VE DENEYSEL SONUÇLAR (SIMULATION AND EXPERIMENTAL RESULTS)

Benzetim (simülasyon) çalışmalarında, Proakis kanal profili [17], ortalama dalga ağırlık katsayıları (0,227; 0,460; 0,688; 0,460; 0,227) olan, 5 dallı Rayleigh kanal modeli kullanılmıştır. Hem benzetim çalışmalarında kullanılan kanalı hem de deneysel çalışmalardan ölçülen gerçek kanalları denkleştirmek için klasik LMS ve RLS algoritmaları ile 5 dallı ileri beslemeli süzgeç ve 4 dallı geri beslemeli süzgeçten oluşan karar geri beslemeli denkleştirici kullanılmıştır.

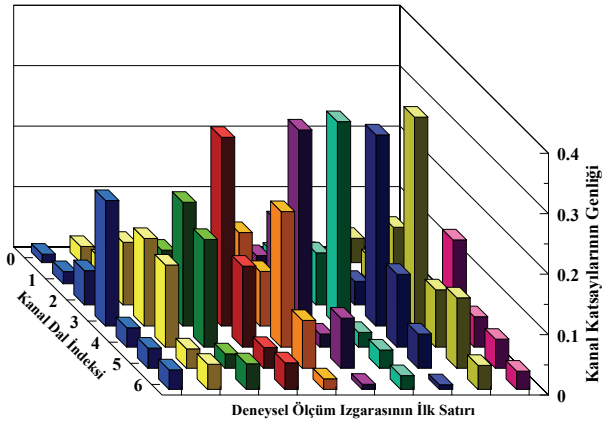


Şekil 3. Deneysel çalışmalarda ölçülen gerçek kanal vuruş tepkisi (An actual channel impulse response measured in experimental studies).

Söz konusu algoritmalarla teorik ve deneysel BER başarımları ÖĞRENME ve İZLEME evresi kullanılarak elde edilmektedir. Öğrenme evresinde denkleştirici katsayılarını kestirmek için 384 (=6X64 CAZAC) bit uzunluklu öğrenme dizisi kullanılmaktadır. İzleme evresinde ise 4080 (=2X2040) bit data dizisi üzerinden CFO izlemesi gerçekleştirilerek BER hesabı yapılmaktadır. Bu makalede, deneysel ve simülasyon çalışmaları için hem öğrenme hem de izleme evresinde klasik LMS-

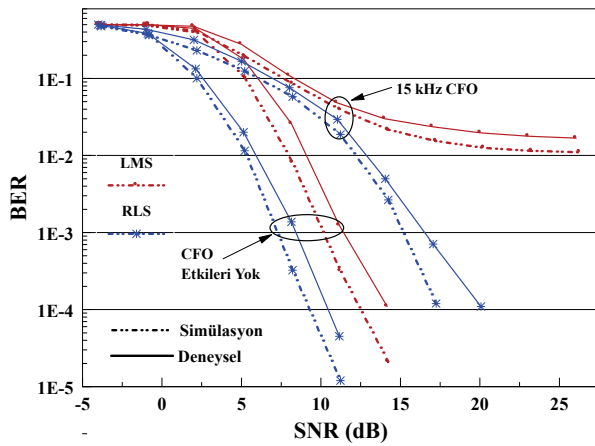
DFE algoritmasının hem ileri besleme hem de geri besleme filtrelerini güncellemede kullanılan adım büyüklüğü [17]'de olduğu gibi 0,045 ve klasik RLS-DFE algoritmasının unutma faktörü 0,999 alınarak bilgisayar benzetimleri yapılmıştır.

Deneysel çalışmalarda elde edilen gerçek kanal ölçümlerine ait olan ortalama kanal vuruş tepkisi CFO etkileri yok iken Şekil 3'te ve 15 kHz'lik CFO etkisi var iken Şekil 4'te sırayla verilmektedir.



Şekil 4. Deneysel çalışmalarda 15 kHz CFO için ölçülen gerçek kanal vuruş tepkisi (An actual channel impulse response measured in experimental studies for 15 kHz CFO).

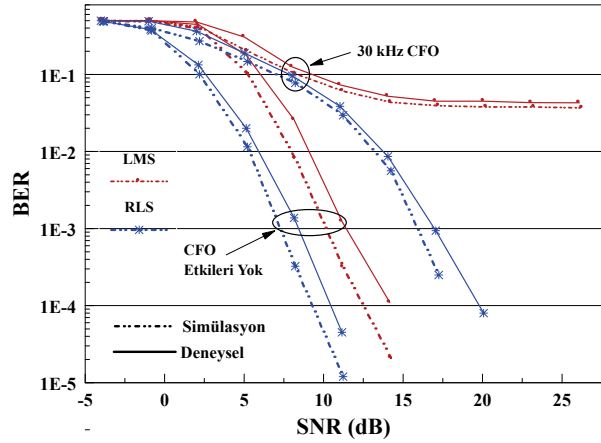
Şekil 5, 6 ve 7'de klasik LMS ve RLS algoritmaları ile 15, 30 ve 50 kHz'lik CFO olması durumunda kanal denkleştirmeye ilişkin BER-SNR başarımları eğrileri verilmiştir.



Şekil 5. WiMAX radyo sisteminde 15 kHz CFO için klasik LMS ve RLS-DFE ile kanal denkleştirmeye ilişkin BER başarımları (BER performances related to channel equalization with conventional LMS and RLS-DFE for 15 kHz CFO in WiMAX radio system).

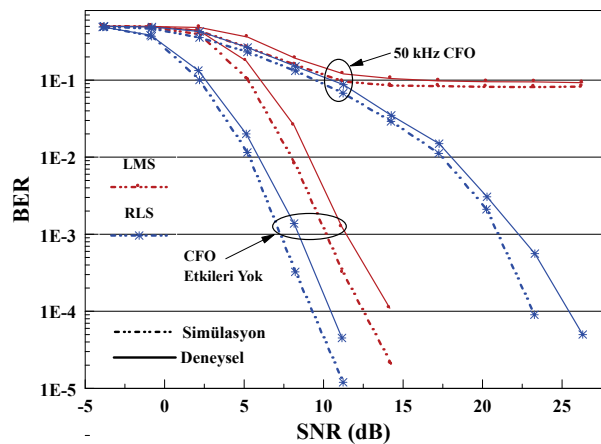
1. Şekil 5'te deneysel WiMAX radyo sisteminde CFO etkileri yokken ve 15 kHz'lik CFO olması durumunda elde edilen denkleştirici başarımları incelendiğinde, RLS algoritması ile CFO etkilerinin

olmadığı durumdaki başarımları arasında  $1E-3$  BER değeri için yaklaşık olarak 8 dB'lik fark olmaktadır. Buna karşılık LMS algoritması ise yaklaşık olarak  $1E-2$  BER tabanına yakınsamaktadır. Deneysel ve simülasyon BER başarımları incelendiğinde, simülasyon başarımlarının deneysel başarımlardan daha iyi olduğu gözlenmektedir. Bunun nedeni simülasyon çalışmasında her kanal döngüsü için aynı kanal profili alınarak değerlendirme yapılırken deneysel çalışmalarda Şekil 3 ve 4'ten de görüldüğü gibi her bir ölçümde kanal profili değişmektedir.



Şekil 6. WiMAX radyo sisteminde 30 kHz CFO için klasik LMS ve RLS-DFE ile kanal denkleştirmeye ilişkin BER başarımları (BER performances related to channel equalization with conventional LMS and RLS-DFE for 30 kHz CFO in WiMAX radio system).

2. Şekil 6'da 30 kHz'lik CFO olması durumunda elde edilen denkleştirici başarımları incelendiğinde, RLS algoritması ile CFO etkilerinin olmadığı durumdaki başarımları arasındaki fark  $1E-3$  BER değeri için yaklaşık olarak 9 dB'ye çıkmaktadır. Buna karşılık LMS algoritması ise yaklaşık olarak  $5E-2$  BER tabanına yakınsamaktadır.



Şekil 7. WiMAX radyo sisteminde 50 kHz CFO için klasik LMS ve RLS-DFE ile kanal denkleştirmeye ilişkin BER başarımları (BER performances related to channel equalization with conventional LMS and RLS-DFE for 50

kHz CFO in WiMAX radio system).

3. Şekil 7'de 50 kHz'lik CFO olması durumunda elde edilen denkleştirici başarımları incelendiğinde, RLS algoritması ile CFO etkilerinin olmadığı durumdaki başarımlar arasında  $1E-3$  BER değeri için yaklaşık olarak 16 dB'lik fark oluşmaktadır. Buna karşılık LMS algoritması ise yaklaşık olarak  $1E-1$  BER tabanının biraz altına yakınsamaktadır.

Elde edilen bu simülasyon ve deneysel çalışmalardan da görüldüğü gibi, RLS algoritması ile 50 kHz'lik CFO olması durumunda bile CFO izlemesi hem deneysel hem de simülasyon olarak yapılabilmektedir. Bununla birlikte, LMS algoritması ile CFO izlemesi yapılamadığı ortaya çıkmaktadır. Bundan dolayı, hesaplama karmaşıklığını arttırmadan LMS algoritmasının başarımlarını artıracak yeni algoritmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

## 5. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu makalede, tek taşıyıcılı WiMAX radyo sisteminde QPSK modülasyonunu kullanarak CFO etkilerini incelemek için deneysel ve simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Çalışmada, benzetimlerde kullanılan belirli bir kanal profili (5 dallı Proakis kanal profili) ile gerçek ortamda frekans seçici Rayleigh sönümlenmeli kanalların elde edildiği ölçümlerden yararlanarak alıcıda klasik LMS-DFE ve RLS-DFE gibi denkleştirme algoritmalarının BER başarımları hem deneysel hem de simülasyonla karşılaştırmalı olarak elde edilmiştir. Elde edilen benzetim sonuçlarından RLS algoritması ile CFO izlemesi yapılabildiği ancak LMS algoritması ile CFO izlemesinin yapılamadığı anlaşılmıştır. Elde edilen deneysel ve simülasyon sonuçlarının birbirleriyle son derece uyumlu ve gayet tatmin edici olduğu gözlenmiştir.

## 6. TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)

Yazarlar, KTÜ DSP Laboratuvarı öğretim üyelerinden İsmail Kaya'ya çok değerli katkıları, yorumları ve önerileri için teşekkür eder.

## 7. KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Ghosh, A., Wolter, D.R., Andrews, J.G., Chen, R., "Broadband wireless access with WiMAX/802.16: current performance benchmarks and future potential", **IEEE Communications Magazine**, Vol. 43, Issue 2, 129-136, Feb. 2005.
- Ahmadi, S., "An overview of next-generation Mobile WiMAX technology", **IEEE Communications Magazine**, Vol. 47, No. 6, 84-98, June 2009.
- Juan, H., Hsiang, -C., "Scalable Video Streaming over Mobile WiMAX", **IEEE International Symposium on Circuits and Systems, ISCAS 2007**, 3463-3466, 27-30 May 2007.
- Intel White Paper, "Wi-Fi and WiMAX Solutions: Understanding Wi-Fi and WiMAX as Metro-Access Solutions," Intel Corporation, 2004.
- Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems, **IEEE Standard 802.16-2004**, 2004.
- Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems, **IEEE Standard 802.16e/D10**, 2005.
- Kaya, I., Türk, K., Baltacı, Y., "Experimental BER Performance Evaluation of OFDM and Single Carrier Transmissions in Real-Time WIMAX Radio", **IEEE 18th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, PIMRC 2007**, Athens, Greece, 1 – 5, 3-7 Sept. 2007.
- Hashemi, H., "The indoor radio propagation channel", **Proceedings of the IEEE** Vol. 81, Issue 7, 943 – 968, July 1993.
- Rappaport, T.S., Seidel, S.Y., Takamizawa, K., "Statistical channel impulse response models for factory and open plan building radio communicate system design", **IEEE Transactions on Communication**, Vol. 39, Issue 5, 794 – 807, May 1991.
- Saleh, A., Valenzuela, R., "A Statistical Model for Indoor Multipath Propagation", **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, Vol. 5, Issue 2, 128 – 137, Feb 1987.
- Porter, J.W., Lisica, I., Buchwald, G., "Wideband Mobile Propagation Measurements at 3.7 GHz in an Urban Environment", **IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium**, Vol. 4, 3645 – 3648, 20-25 June 2004.
- Ciccognani, W., Durantini, A., Cassioli, D., "Time Domain Propagation Measurements of the UWB Indoor Channel Using PN-Sequence in the FCC-Compliant Band 3.6–6 GHz", **IEEE Transaction on Antennas and Propagation**, Vol. 53, No. 4, 1542 – 1549 April 2005.
- Abdi, A., Wills, K., Barger, H.A., Alouini, M.-S., Kaveh, M., "Comparison of the level crossing rate and average fade duration of Rayleigh, Rice and Nakagami fading models with mobile channel data", **IEEE 52nd Vehicular Technology Conference, VTS-Fall VTC 2000**, Vol. 4, 1850 – 1857, 24-28 Sept. 2000.
- Takai, H., "In-Room Transmission BER Performance of Anti-Multipath Modulation PSK-VP", **IEEE Transaction on Vehicular Technology**, Vol. 42, No. 2, 177-185, May 1993.
- Haykin, S., **Communication systems**, John Wiley and Sons, Third Edition, 1994.
- Tellado-Mourello, J., Wesel, E.K., Cioffi, J.M., "Adaptive DFE for GMSK in indoor radio

- channels” **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, Vol. 14, Issue 3, 492 – 501, April 1996.
17. Proakis, J.G., **Digital Communications**, Fourth Edition, McGraw-Hill Co., Singapore, 2001.
18. Soysal, B., “**High Performance Receiver Design for OFDM based Wireless Communications**”, PhD Thesis, Karadeniz Technical University, Trabzon, October 2004.
19. Tubbax, J., Van der Perre, L., Engels, M., De Man, H., Moonen, M., “OFDM versus Single Carrier: A Realistic Multi-Antenna Comparison”, **EURASIP Journal on Applied Signal Processing**, 1275–1287, 2004.
20. Özen, A., Güner, A., Çakır, O., Tuğcu, E., Soysal, B., Kaya, İ., “Tek Taşıyıcılı Gerçek Zaman WiMAX Radyo İçin Kör Uyarlanır Denkleştirme Algoritmalarının Deneysel Başarımları”, **IEEE SİU 2009 17. Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı**, Antalya, 472-475, 9-11 Nisan 2009.

